蝎虎类星体Mrk 421的宽带能谱光变特性分析*

郭燕飞[1]，孙建圆[1]，宋雨洁[1]，徐云冰[1]，谢照华[1]，杜雷鸣[1]
(1. 云南师范大学物理与电子信息学院，云南 昆明 650500)

摘 要： 我们搜集了Mrk 421的光变宽带能谱（Spectral Energy Distributions，SEDs）数据，共有73个态作为研究样本，使用电子能谱为稳态拐折幂律谱下的单区轻子模型进行拟合，进而研究Mrk 421在光变时喷流的物理性质。我们的主要结果如下：（1）样本中磁场B和多普勒因子δ之间存在显著反相关，说明B和δ在汤姆逊区相互依赖。（2）电子谱指数p_1支持Mrk 421光变时的激波解释或磁重联等解释。（3）同步峰值频率$log\nu_{syn}^{pk}$和峰值光度$log\nu_{syn}^{pk}L_{syn}^{pk}$之间存在正相关关系，意味着Mrk 421在光变时存在反耀变体序列。（4）根据均分参数$\varepsilon = U_e/U_B$（相对论电子能量密度与磁场能量密度的比值）有26%的态的电子能量和磁场能量接近均分，63%的态的电子能量比磁场能量大一个数量级，11%的态的电子能量远大于磁场能量，这说明Mrk 421在光变过程中更可能出现电子能量比磁场能量大一个数量级的情况，同时也意味着Mrk 421中的喷流是以粒子为主导；从$P_e > P_B$的关系，进一步表明了Mrk 421的喷流是以粒子为主导，$P_B \lesssim P_r$，意味着坡印廷通量不能解释辐射功率，P_r/P_e的范围为0.01~0.51，说明相对论电子能量中的一小部分可能用于观测到的辐射。（5）3C 279和Mrk 421的一些物理参数范围可能比较接近，但这两个源喷流内的物理过程可能是不一样的。

关键词： 蝎虎天体； Mrk 421；光变；

0 引 言

光变是耀变体（blazar）的最显著特征之一[1]。研究耀变体的光变具有重要的意义，其研究内容和主要研究问题可参见文[2]及其中参考文献，此处不详述。

在耀变体光变的研究中，通常有两类途径：一类是固定频率（频段）处的光变特性研究（如光学/紫外波段，X射线波段或者γ波段等，如文[3]，另一类是多波段光变数据联合形成宽波段同时/准同时性SED数据。考虑到不同的态之间的变化都可以联系到内在物理机制上的不同，于是可以使用模型拟合方法来进行物理特性间不同的研究，如文[4]和文[5]。第一类研究中，一般进行时域研究，如RMS-计数率关系研究，功率谱分析等，和谱形研究，如硬度比值（Hardness ratio），波段谱形拟合等。此类方式的优点是特定频率（频段）处观测数据相对丰富而便于深入研究。对第二类研究途径而言，宽波段同时/准同时性SED数据样本相对要小些，但是优势在于能够通过模型拟合提供光变过程中辐射区物理条件的变化信息，从而为了解光变过程涉及的粒子加速和辐射过程提供洞察。本文将使用这一研究路径。

Mrk 421 是银河系附近的一个耀变体源，没有明显的发射线或吸收线，在光学波段具有强的偏振，而在射电波段具有致密（毫弧秒尺度）结构。因此，它被归类为蝎虎天体（BL Lacs）。它的宽带能谱分布(SED)可以用典型的双峰形状来描述[6][7]。在更一般的耀变体背景下，Mrk 421 属于高峰频蝎虎天体的一个子类，其 SED 的两个峰都位于相对较高的能量(分别在~1Kev和~100Gev)[8]。Mrk 421 是高峰频蝎虎天体中研究最全面的耀变体之一，也是人类通过惠普尔 10 米切伦科夫望远镜首次探测到银河系外的TeV源[9]。Mrk 421 的红移为0.031[9]，是距离我们最近的 blazar 天体之一。近年来，有关 Mrk 421 的多波段光变特性和周期性光变现象等问题已经引起很多学者的关注，并针对该问题进行了大量的研究工作[3][4][9]。Mrk 421 在光学波段表现出剧烈的光变现象，曾经在2.5h内变化1.4mag，光变非常迅速。后来分别在红外、X 射线、γ射线波段都观测到 Mrk 421 的快速而大幅的光变，甚至是大幅度的爆发现象[8][10][11]。可以看到，Mrk 421 几乎一直处于很活跃的状态[10]。研究 Mrk 421 的光变特性，对 blazar 物理性质的研究和物理模型的建立都具有重要的意义。

关于Mrk 421迄今为止已经进行大量的第二类研究，如文[11-14]。但是这些研究中态的样

* 基金项目：国家自然科学基金（U1431123,10973034）；云南省自然科学基金资助项目（2017FD072）资助.
作者简介：郭燕飞，女，硕士研究生. 研究方向：理论物理. Email: 2680577037@qq.com
通讯作者：杜雷鸣，男，副教授. 研究方向：理论物理和天体物理. Email: 173998058@qq.com

本数量依然不足以支持统计上有意义的分析结果（其中文[12]是最多的一个研究仅研究了18个态）。所以本文搜集了一个足够大的，含有Mrk 421共73个光变态的样本来进行研究，以期对该源光变时外在观测和内在物理的特性进行分析，得到比较可靠的统计结果。

1 SED样本描述

本文从文[8，12-13，15-22]中搜集了 Mrk 421 的 73 个态的同时/准同时性/非同时或准同时性 SED 数据作为样本，其观测数据覆盖范围从射电波段到γ射线波段。这是迄今为止关于这个源光变 SED 的最大样本。

本文中把观测时间在 1 周内的称为同时性数据，在 2 个月内称为准同时性数据[24]。另外我们把一个同时/准同时性/非同时或准同时性 SED 数据所描写的状态简称为一个“态”。一次光变过程一般包含若干个态。详情参见表 1。

2 模型及拟合结果

2.1 模型及拟合过程简介

本文我们使用最为常见的均匀单区轻子模型来进行数据拟合。在此模型中，辐射区被假设为一个充满均匀分布的电子的球形区域，半径为$R(cm)$。由于某种原因，这个区域保持其形状不变，而且以相对论性速度沿喷流轴向匀速运动，速度用多普勒因子δ刻划。δ定义为$\delta=[\Gamma(1-\beta cos\theta)]^{-1}$，这里$\Gamma$是辐射区运动的洛伦兹因子，$\beta=\upsilon/c$，而$\theta$为辐射区运行的轴向与观测者视向之间的夹角。球形辐射区处于大小相同但是方向混沌的磁场B中。辐射区中的电子的能谱（EED）用拐折的形式，形如

$$N(\gamma)=\begin{cases} N_0\gamma^{-p_1} & (\gamma_{min}<\gamma<\gamma_b) \\ N_0\gamma_b^{p_2-p_1}\gamma^{-p_2} & (\gamma_b<\gamma<\gamma_{max}) \end{cases} \quad (1)$$

这里，γ_{min}和γ_{max}分别是电子洛伦兹因子的上下界，而γ_b是拐折洛伦兹因子。p_1和p_2是拐折两侧 EED 的电子谱指数。N_0为归一化因子。在确定了这些参数的值之后，单区模型就可以给出一条拟合曲线。

根据文[24]可知，在拟合 BL Lac 源时为了避免简并（两组或者更多组不同的物理参数组合却能够得到一致的拟合 SED）的情况出现，需要把四个参数：磁场B、多普勒因子δ、辐射区半径R和 EED 中的归一化因子N_0四者固定其中一个。基于扩散激波加速的假设，考虑到不同的态是由相似的激波导致[19]，于是若干前人都采取固定辐射区半径的方案，从文[11,25,26,12]中得到辐射区半径R的范围在$0.25\times10^{16}cm$到$5.2\times10^{16}cm$。与文[11,19]根据最小光变时标来确定辐射区半径R的大小的方案一致，我们固定辐射区半径为$R=1.0\times10^{16}\ cm$。

对于电子的最小洛伦兹因子γ_{min}的选择，根据文[25,27,19,21]，为了避免过大的射电波段流量值、拟合光学段数据，以及减少自由参数的数量，γ_{min}设定范围一般在$500-800$之间。这里我们和文[27,19]一致，取$\gamma_{min}=500$。

根据文[28-29]，耀变体的射电波段辐射产生于喷流之外，而不在喷流区域。喷流产生的辐射在$\lesssim10^{12}$Hz时会由于同步自吸收而明显减弱。本文的研究聚焦于内喷流产生的多波段 SED 的物理性质，所以本文中射电波段数据的处理方法和文[2]中一致。

拟合过程中，由于 Mrk 421 同步峰所在的 X 段观测数据较为丰富，而红外-光学-紫外波段数据相对较少，此外红外-光学-紫外波段观测到的辐射有可能被寄主星系的热辐射主导[30]，所以拟合过程中在保证卡方值足够小的条件下，我们赋予 X 段的数据更高的权重，以便使拟合曲线更好地适配同步峰峰值处的形状。这相当于把红外-光学-紫外波段数据认为是喷流辐射的上界[12]，而主要依靠同步峰和 IC 峰峰值处的数据来决定拟合参数，这样做和文[19]的处理一致。在文[19]中根据若干证据发现，紫外波段的辐射应该和 X 段的不同源，这和我们的判断是一致的。

2.2 拟合结果

拟合的样本及模型参数表参见表1，SED图参见图1-2，图1-2只放了拟合图的一部分，时间为MJD 55266-55277的态的图。

表 1 中每列的详细信息如下：第（1）列，样本观测时间；第（2）列，磁场；第（3）

列，多普勒因子；第（4）列，EED 的归一化因子；第（5）列，电子的最大洛伦兹因子；第（6）列，EED 拐点的洛伦兹因子；第（7）列，同步峰左侧光薄段的谱指数；第（8）列，同步峰右侧光学薄段的谱指数；第（9）列，卡方。我们的结果表明，拐折幂律谱 EED 的稳态单区均匀轻子模型能够较理想地拟合 73 个包含光学、$X-ray$和$\gamma-ray$波段在内的 SED 观测数据。

表 1 样本及模型参数

Table1 The sample and model parameters

Time period(MJD)	B（G） $\times 10^{-2}$	δ	N $\times 10^{-3}$	γ_{max} $\times 10^{7}$	γ_b $\times 10^{5}$	p_1	p_2	$\chi^2/d.o.f$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
55245—55246	4.10	40.12	9.00	1.00	3.62	2.18	4.12	2.85/16
55240—55242	5.50	33.92	24.00	1.00	2.34	2.38	4.46	1.87/13
55243	3.90	48.00	2.00	1.00	3.64	1.98	4.45	13.65/26
Steady state	6.00	32.00	7.00	1.00	1.86	2.21	4.58	73.95/33
54594	13.40	24.00	4.20	1.00	1.13	2.04	4.08	0.73/19
54683-55000	7.00	28.00	7.60	1.00	1.86	2.16	4.62	21.72/29
55144-55149	5.20	26.00	3.80	1.00	4.46	1.92	3.70	10.34/17
55242-55244	11.00	15.00	8.00	1.00	4.02	1.83	4.42	21.75/23
55245-55271	18.50	16.00	3.80	1.00	2.86	1.92	4.38	58.97/27
55516-56106	8.00	23.00	13.60	1.00	1.39	2.23	4.68	26.11/27
55811-55818	12.60	26.00	10.00	1.00	3.86	2.32	4.71	15.57/14
56117-56129	7.80	22.00	15.00	1.00	1.62	2.04	4.68	15.88/17
56130-56186	9.00	30.00	14.70	1.00	1.62	2.26	5.12	10.78/20
55121-55153	5.60	36.00	9.00	1.00	3.93	2.28	4.12	17.77/11
55242-55245	7.94	18.00	5.30	1.00	4.32	1.79	4.32	18.83/21
55475-55503	6.11	24.00	12.30	1.00	4.02	2.16	4.16	12.60/14
55516-55801-55831-56106	12.20	17.00	19.00	1.00	1.64	2.27	4.93	13.75/32
55811-55822	5.10	30.00	10.30	1.00	3.92	2.18	4.12	9.55/9
56117-56187	10.30	19.00	41.00	1.00	2.56	2.34	4.43	7.85/20
56302	32.70	16.00	4.70	1.00	0.38	1.92	4.82	74.10/29
56312	20.00	17.00	10.00	1.00	0.76	2.18	4.9	162.12/29
55267	2.92	40.00	4.60	1.00	3.98	2.04	4.87	7.05/26
55269	4.90	42.00	8.40	1.00	3.12	2.28	4.51	31.25/30
55271	6.60	27.00	8.00	1.00	2.51	2.10	4.28	13.42/17
55272	6.50	32.00	6.70	1.00	2.52	2.18	5.18	10.86/24
55273	6.10	34.00	2.17	1.00	1.82	1.98	4.61	10.49/23
56394-56395	10.30	45.00	3.50	1.00	1.21	2.09	3.77	0.25/18
56396-56397	13.10	32.00	9.00	1.00	1.42	2.22	3.41	5.42/16

续表 1
Continued table1

Time period(MJD) (1)	B（G） $\times 10^{-2}$ (2)	δ (3)	N $\times 10^{-3}$ (4)	γ_{max} $\times 10^{7}$ (5)	γ_b $\times 10^{5}$ (6)	P_1 (7)	P_2 (8)	$\chi^2/d.o.f$ (9)
54474	5.06	48.00	1.14	1.00	0.64	1.79	3.81	6.30/19
54559	3.35	50.00	3.00	1.00	2.20	2.03	3.98	12.75/19
54508.3	6.24	28.60	2.00	1.00	1.52	1.76	3.94	0.44/15
54509.37	15.60	20.00	1.70	1.00	1.17	1.70	4.12	11.24/15
54538.42	11.20	21.00	1.60	1.00	1.27	1.70	4.29	2.83/12
54556.24	10.00	20.00	7.60	1.00	3.08	2.04	3.64	11.66/7
54557.26	3.00	35.00	7.30	1.00	3.08	2.04	3.64	2.23/9
54562.25	19.00	16.00	9.40	1.00	2.14	2.06	4.21	11.39/13
54566.26	20.00	20.00	4.10	1.00	1.24	2.02	3.71	2.51/15
54588.30	3.00	26.00	3.90	1.00	2.98	1.74	3.76	9.94/8
54591.21	10.00	28.00	2.00	1.00	1.12	1.84	3.91	0.93/17
54592.2	18.00	18.00	2.60	1.00	1.08	1.84	3.99	1.41/17
55244	1.20	50.00	1.74	1.00	4.56	1.65	3.98	87.51/25
54590	9.80	30.00	3.60	1.00	1.01	1.98	3.84	0.38/18
54591	12.80	26.00	3.50	1.00	0.92	2.02	3.82	0.68/20
55000-55350	10.90	28.00	13.60	1.00	2.75	2.41	4.78	54.91/32
55475-55505	3.97	38.00	10.00	1.00	3.94	2.24	4.73	43.32/20
55245-55272	11.90	21.00	2.80	1.00	2.74	1.89	4.46	42.94/21
56307	14.60	24.00	5.70	0.06	0.88	2.12	4.75	76.66/33
56335	15.40	23.00	4.80	0.08	0.81	2.06	4.27	9.04/21
55265	2.14	43.00	1.24	1.00	5.48	1.80	4.34	14.22/32
55266	4.27	34.00	2.84	1.00	4.32	1.93	4.75	11.28/29
55268	9.80	30.00	10.40	1.00	2.84	2.30	4.51	46.02/27
55270	4.00	46.00	3.94	1.00	1.21	2.10	3.80	22.67/34
55274	20.40	15.00	7.80	1.00	0.93	2.04	3.75	12.59/22
55275	14.50	15.00	9.00	1.00	1.24	1.95	4.02	9.05/16
55276	20.00	17.00	7.00	1.00	1.48	2.12	4.18	5.07/18
55277	7.90	29.00	4.40	1.00	1.65	2.12	4.21	13.87/20

续表 1

Continued table1

Time period(MJD)	B（G） $\times 10^{-2}$	δ	N $\times 10^{-3}$	γ_{max} $\times 10^{7}$	γ_b $\times 10^{5}$	P_1	P_2	$\chi^2/d.o.f$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
56393	12.30	49.00	4.50	1.00	0.76	2.25	4.19	0.57/16
56393-56394	6.60	49.00	9.10	1.00	1.12	2.29	3.58	0.19/18
56395-56396	10.60	38.00	6.80	1.00	1.32	2.21	4.20	6.42/16
54623	7.80	36.00	1.90	1.00	1.43	1.84	4.19	20.68/13
54628-54630	6.10	34.80	4.00	1.00	3.38	1.96	4.71	13.23/21
54473	6.70	48.00	1.00	1.00	0.58	1.80	3.98	19.37/16
54475	8.52	32.00	1.35	1.00	0.84	1.79	3.98	4.96/10
54481	3.20	50.00	2.30	1.00	0.98	1.91	3.69	29.08/13
54482	4.26	50.00	1.10	1.00	0.78	1.78	3.87	3.46/18
54507	4.40	50.00	1.27	1.00	0.80	1.81	3.48	33.69/20
54558	4.17	50.00	1.27	1.00	0.77	1.86	3.36	3.51/14
54475.43	11.60	25.00	1.80	1.00	1.07	1.79	4.95	8.19/17
54478.41	6.50	36.00	8.00	1.00	1.08	2.12	4.41	9.24/18
54559.25	7.33	32.00	4.20	1.00	2.46	2.04	3.63	3.92/15
54564.19	8.83	33.00	3.10	1.00	1.57	2.01	3.54	38.57/17
54589.21	4.00	21.00	5.30	1.00	2.48	1.86	3.34	0.01/10
54593.23	14.80	24.00	1.89	1.00	0.79	1.84	3.89	7.03/17

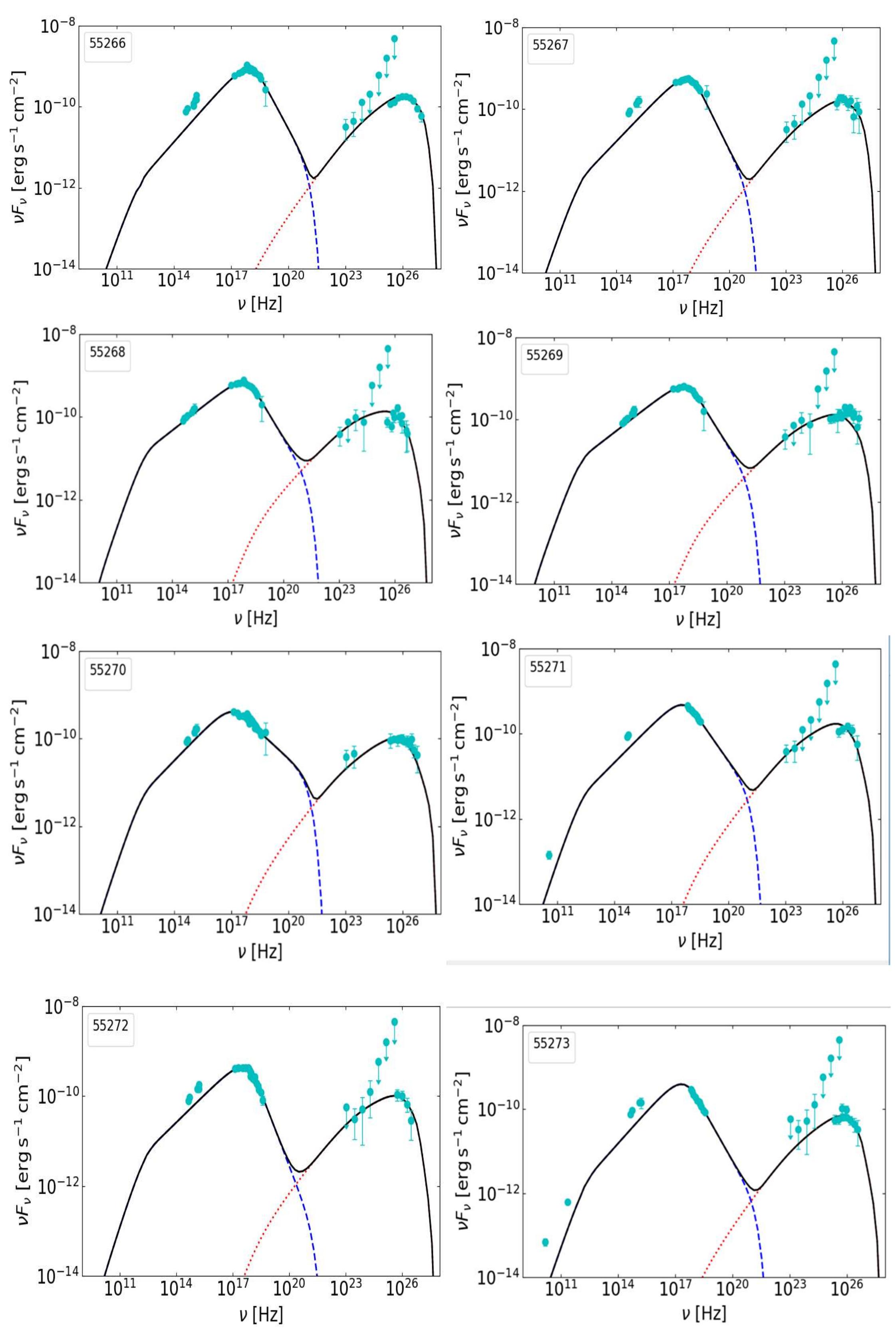


图1 单区均匀轻子模型拟合Mrk 421观测的SED数据图（MJD55266-55273），其中“--”表示同步辐射过程，“..”表示SSC过程，黑色线表示总的拟合线。

Fig.1 The one-zone homogeneous lepton model is fitted to the SED data figure (MJD55266-55273) observed by Mrk 421, where "--" represents the synchrotron radiation process, ".."Indicates the SSC process, and the black line represents the total fitting line.

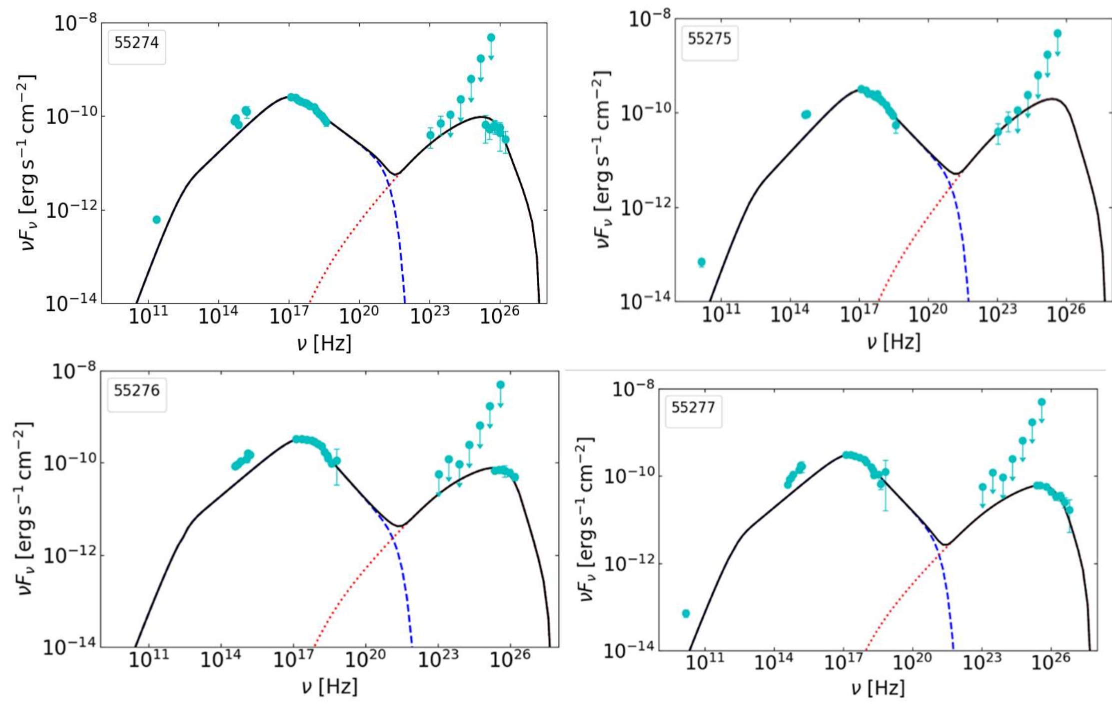


图2 单区均匀轻子模型拟合Mrk 421观测的SED数据图（MJD55274-55277），其中“--”表示同步辐射过程，“..”表示SSC过程，黑色线表示总的拟合线。

Fig.2 The one-zone homogeneous lepton model is fitted to the SED data figure (MJD55274-55277) observed by Mrk 421, where "--" represents the synchrotron radiation process, ".."Indicates the SSC process, and the black line represents the total fitting line.

3 结果与讨论

3.1 拟合结果的物理性质和关系

根据文[11]和文[25]可以得到 Mrk 421 的多普勒因子δ的范围为$15-50$，在我们的拟合结果中，多普勒因子δ范围是$15-50$，与前人得到多普勒因子的范围一致。对于磁感应强度，我们拟合得到的磁感应强度B的范围为$0.012-0.327G$，与文[15]和文[18]给出的磁感应强度B的范围$0.02-0.3G$一致。

3.2 $B-\delta$关系

耀变体喷流的磁感应强度B和多普勒因子δ之间的关系反映了辐射区所处的磁场和辐射区运动速度之间的关联，之前已经有一些研究。文[27]和文[31]对于每一个耀变体只使用一个态刻划，然后对这样的 SED 样本进行分析，两文得到了不同的结果。文[27]对于一个包含 22 个 BL Lac 的样本发现B和δ之间不存在相关性，而文[31]对于一个包含 29 个 TeV BL Lac 源的样本发现B和δ之间存在显著的反相关关系。本文研究的是单一源的不同态的物理性质，目的是探究同一个源的不同态之间的物理差异，角度与前述两文有不同。我们的结果表明，B和δ之间存在显著的反相关性，bisector 分析的结果为$\log\delta=(-0.61\pm0.05)\log B+(0.79\pm0.06)$，相关系数为$r=-0.72$，显著水平为$p=7.32\times10^{-13}$。

根据单区 SSC 模型的单色近似，在 Thomson 区域（即：Thomson 散射截面：入射光子的低能量区域）中有$B\delta\propto(\nu_s^2/\nu_c)(1+Z)$，而在 KN 区域中有$B/\delta\propto(\nu_s/\nu_c^2)(1+Z)$，这里$\nu_s$代表同步峰峰频，而$\nu_c$代表 SSC 峰的峰频。如果认为 Mrk 421 在光变时ν_s^2/ν_c的值在一个狭窄范围内波动，那么可以得到B和δ之间的反相关关系。这个和上述分析一致。而这个结论也和文[31]的分析结论一致。

3.3 相对论电子能谱分布

通过对相对论电子谱指数p_1的研究可以推测出是由什么机制产生的相对论电子。对于相对论电子的谱指数p_1前人有过研究。文[27]用一个态代表一个源，研究了 22 个 BL Lac 源的谱指数p_1和p_2，得到p_1的范围为1.40~2.22谱指数的差值$\Delta p=p_2-p_1$的范围1.00~3.00，并且Δp大多数是在 2.0 附近，但也存在$p_1<1.6$和$\Delta p>2.0$的情况。文[19]对 Mrk

421 时间在 2008 年 8 月到 2013 年 2 月的 7 个态进行分析发现谱指数的差值$\Delta p = p_2 - p_1$大于典型辐射冷却拐折的$\Delta p = 1$，表明拐折不是由辐射冷却引起的。本文工作的目的是在较大样本下研究 Mrk 421 光变时不同态的电子谱指数的差异。在我们的拟合结果中p_1的范围为1.65~2.38。根据文[32] 相对论扩散激波加速预测的正则粒子谱指数p_1在 2.2 附近，在我们的样本中有58%的态的p_1在2.00~2.38，可以用相对论扩散激波去解释。同时还有42%的态的p_1在$p_1 < 2.0$，这意味着可能需要另一种机制去解释。根据文[33]的观点:短时间内被激波加速的粒子在激波下游又被随机过程加速，能够产生比 1 阶费米过程产生的极限值还要硬的谱。文[34]中提出在激波加速中，当存在大的散射角或其他极端条件时，就可以在激波中实现$p_1 < 2.0$。文[35]提出了磁重联也可以产生硬的电子谱。根据p_1的范围可以发现 Mrk 421 在光变时的加速机制不仅仅只是相对论扩散激波，还有可能是因为大的散射角、短时间内被激波加速的粒子在激波下游又被随机过程加速或者磁重联加速。另外由于Δp的范围1.19~3.16，大于典型辐射冷却拐折预言的$\Delta p = 1$[36]，这意味着拐折不是由辐射冷却引起的。文[25]猜测拐折是加速过程的一个特征，大的 γ_b可能是由一种尚未知晓的加速机制引起的，γ_b应该是加速过程可以获得的最大能量，取决于粒子在激波区域内的加速时标。

3.4 同步峰的峰值频率ν_{syn}^{pk}—峰值光度$\log\nu L_{\rm syn}^{\rm pk}$相关性

目前， 对于同步峰峰值频率（ν_{syn}^{peak}）和峰值光度（$\nu L(\nu)_{syn}^{peak}$）的关系，无论是耀变体群体还是单个耀变体都有研究。文[37]是最早研究不同源的同步峰的峰值频率−峰值光度之间的关系，在文[37]的文章采用一个态代表一个源。文[38]发现 Mrk 421 的同步峰的峰值频率和峰值光度之间存在正相关关系，之后他们将文[38]和文[39]中关于 Mrk 421 的同步峰的峰值频率和峰值光度的数据融合，得到$\nu L_{\rm syn}^{\rm pk} \propto {\nu_{syn}^{pk}}^{(0.42\pm0.06)}$的结果。文[40]在 3C 279 的四个态和 Mrk 501 的四个态中分别发现了同步峰的峰值频率−峰值光度之间有相关性. 文[41]进一步研究了包含 14 个高同步峰频 BL Lac 源的同步峰的峰值频率和峰值光度之间，这 14 个高同步峰频中，有$\frac{9}{14}$的源显示同步峰的峰值频率和峰值光度为正相关关系，有$\frac{5}{14}$的源显示同步峰的峰值频率和峰值光度没有相关性或负相关。人们把同步峰的峰值频率和峰值光度之间的反相关关系成为“耀变体序列”，相应的正相关关系称为“反耀变体序列”。本文也对 Mrk 421 的此关系进行了相关性研究。我们的拟合结果表明同步峰的峰值频率ν_{syn}^{pk}与峰值光度$\log\nu L_{\rm syn}^{\rm pk}$之间存在正相关关系，皮尔逊（Pearson）相关系数$r = 0.40$，$p = 3.99 \times 10^{-4}$，表明 Mrk 421 在光变时存在反耀变体序列。

文[38]中提到ν_{syn}^{pk}和$\nu L_{\rm syn}^{\rm pk}$之间可以用幂律的形式表示，即$\nu_{syn}^{pk} \propto {\nu L_{\rm syn}^{\rm pk}}^{\alpha}$。在单区 SSC 模型中，使用单色近似可以得到$\nu_{\rm syn}^{\rm pk} L_{\rm syn}^{\rm pk} \propto N\gamma_{\rm b}^2 B^2 \delta^4$和$\nu_{\rm syn}^{\rm pk} \propto \gamma_{\rm b}^2 B\delta$两个关系，N 为辐射电子的数密度。同时文[42]中提到当$\alpha = 1$时光变由γ_b主导，当$\alpha = 2$时光变由磁场变化主导，当$\alpha = 4$时光变由多普勒因子δ的变化主导，当$\alpha = \infty$时光变由辐射电子数密度 N 主导。在我们的结果中$\nu_{syn}^{pk} \propto {\nu L_{\rm syn}^{\rm pk}}^{0.67}$，这意味着多普勒因子δ和辐射电子数密度 N 不太可能是 Mrk 421 光变的主导因素，Mrk 421 的光变更可能是因为γ_b的变化。

3.5 喷流的物理性质

研究喷流功率有助于我们研究喷流的产生和组成，通过对光谱能量分布的拟合估算喷流功率。假设喷流功率由四部分组成：相对论电子功率、冷质子功率、磁场功率和辐射所携带功率[43]，即:

$$P_{\rm jet} = \pi R^2 \Gamma^2 c\left(U_{\rm e} + U_{\rm p} + U_{\rm B} + U_{\rm r}\right) \quad (2)$$

其中，$U_{\rm e}$是相对论电子能量密度；$U_{\rm p}$是冷质子能量密度；$U_{\rm B}$是磁场能量密度；$U_{\rm r}$是辐射能量密度，计算公式为：

$$U_{\rm e} = m_{\rm e} c^2 \int N(\gamma)\gamma {\rm d}\gamma \quad (3)$$

$$U_{\rm p} = m_{\rm p} c^2 \int N(\gamma) {\rm d}\gamma \quad (4)$$

$$U_{\mathrm{B}}=\frac{B^2}{8\pi} \tag{5}$$

$$U_{\mathrm{r}}=\frac{L_{\mathrm{obs}}}{4\pi R^2 c\delta^4} \tag{6}$$

其中，$L_{\mathrm{obs}}=4\pi D_L^2 F$，$L_{\mathrm{obs}}$为观测到的总非热辐射光度；$D_L$为光度距离；$F$为观测流量。此外根据文[44]也计算了均分参数和磁化参数，计算公式为：

$$\varepsilon=\frac{U_e}{U_B} \tag{7}$$

计算得到的参数见表 2。表 2 中每列的详细信息如下：第（1）列，样本观测时间；第（2）列，喷流总功率；第（3）列，相对论电子功率；第（4）列，磁场功率；第（5）列，冷质子功率；第（6）列，辐射功率；第（7）列，相对论电子能量密度；第（8）列，磁场能量密度；第（9）列，均分参数。

表 2 样本中相对论电子能量密度，磁场能量密度以及各种功率

Table 2 Relativistic electron energy density, magnetic field energy density and various kinds of power in the sample

Time period(MJD)	$P_{jet}(erg\cdot s^{-1})$ $\times 10^{44}$	$P_e(erg\cdot s^{-1})$ $\times 10^{43}$	$P_B(erg\cdot s^{-1})$ $\times 10^{42}$	$P_p(erg\cdot s^{-1})$ $\times 10^{43}$	$P_r(erg\cdot s^{-1})$ $\times 10^{42}$	$U_e(erg\cdot cm^{-3})$ $\times 10^{-3}$	$U_B(erg\cdot cm^{-3})$ $\times 10^{-4}$	$\varepsilon = U_e/U_B$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
55245—55246	2.02	11.17	1.01	8.69	2.06	7.37	0.67	110.20
55240—55242	2.73	12.86	1.30	14.16	1.80	11.87	1.20	98.62
55243	1.03	6.67	1.31	3.32	1.54	3.07	0.61	50.80
Steady state	1.04	5.46	1.38	4.73	1.06	5.66	1.43	39.51
54594	0.47	2.45	3.88	1.64	2.61	4.52	7.14	6.33
54683-55000	0.85	4.56	1.44	3.63	1.40	6.18	1.95	31.70
55144-55149	0.74	4.97	0.68	1.97	3.98	7.80	1.08	72.53
55242-55244	0.83	4.77	1.02	1.53	18.79	22.51	4.81	46.75
55245-55271	0.36	1.68	3.28	0.75	8.58	6.98	13.62	5.12
55516-56106	0.89	4.52	1.27	4.14	1.36	9.07	2.55	35.62
55811-55818	0.80	3.64	4.02	3.63	3.27	5.72	6.32	9.06
56117-56129	1.32	7.64	1.10	4.93	5.13	16.75	2.42	69.21
56130-56186	1.58	7.81	2.73	7.43	2.81	9.21	3.22	28.58
55121-55153	1.37	6.95	1.52	6.45	1.67	5.70	1.25	45.65
55242-55245	0.84	5.53	0.77	1.53	12.69	18.14	2.51	72.30
55475-55503	1.05	5.83	0.81	4.32	2.87	10.74	1.48	72.34
55516-55801-55831-56106	0.66	3.18	1.61	3.06	2.21	11.67	5.92	19.70
55811-55822	1.31	7.19	0.88	5.56	2.20	8.48	1.03	81.96
56117-56187	1.60	7.53	1.44	7.82	5.34	22.14	4.22	52.44
56302	0.36	1.32	10.26	0.91	3.67	5.46	42.55	1.28
56312	0.43	1.92	4.33	1.73	2.27	7.05	15.92	4.43
55267	1.39	8.69	0.51	5.01	1.11	5.77	0.34	170.08
55269	1.72	8.71	1.59	8.19	1.27	5.24	0.96	54.85
55271	0.96	5.47	1.19	3.75	2.45	7.97	1.73	45.97
55272	0.95	5.09	1.62	4.11	1.40	5.27	1.68	31.37
55273	0.53	3.24	1.61	1.81	1.00	2.97	1.48	20.07
56394-56395	1.22	6.39	8.05	4.60	4.15	3.35	4.22	7.94
56396-56397	1.28	6.11	6.59	5.34	7.04	6.33	6.83	9.27

续表 2

Continued table 2

Time period(MJD) (1)	P_{jet}(erg · s^{-1}) × 10^{44} (2)	P_e(erg · s^{-1}) × 10^{43} (3)	P_B(erg · s^{-1}) × 10^{42} (4)	P_p(erg · s^{-1}) × 10^{43} (5)	P_r(erg · s^{-1}) × 10^{42} (6)	U_e(erg · cm^{-3}) × 10^{-3} (7)	U_B(erg · cm^{-3}) × 10^{-4} (8)	$\varepsilon = U_e/U_B$ (9)
54474	0.77	5.04	2.21	2.32	0.81	2.32	1.02	22.81
54559	1.40	8.65	1.05	5.15	1.05	3.67	0.45	82.28
54508.3	0.64	4.51	1.19	1.51	2.64	5.85	1.55	37.77
54509.37	0.37	2.13	3.65	0.68	5.80	5.64	9.68	5.83
54538.42	0.35	2.25	2.07	0.70	3.31	5.41	4.99	10.84
54556.24	0.64	3.59	1.50	2.07	6.22	9.54	3.98	23.98
54557.26	1.69	10.57	0.41	6.08	1.86	9.17	0.36	255.95
54562.25	0.54	2.50	3.46	1.61	9.02	10.38	14.36	7.23
54566.26	0.41	1.82	6.00	1.14	5.57	4.82	15.92	3.03
54588.30	1.28	9.86	0.23	2.51	3.70	15.48	0.36	432.39
54591.21	0.49	2.98	2.94	1.31	2.75	4.03	3.98	10.13
54592.2	0.31	1.58	3.93	0.70	4.43	5.17	12.89	4.01
55244	3.32	28.22	0.13	4.69	2.46	11.99	0.06	2092.06
54590	0.68	3.88	3.24	2.33	2.59	4.57	3.82	11.96
54591	0.48	2.48	4.15	1.64	2.34	3.90	6.52	5.98
55000-55350	1.06	4.69	3.49	5.35	1.96	6.35	4.73	13.44
55475-55505	1.79	9.46	0.85	8.24	1.25	6.96	0.63	110.97
55245-55272	0.41	2.36	2.34	0.98	5.03	5.68	5.63	10.08
56307	0.53	2.56	4.60	2.07	1.94	4.72	8.48	5.57
56335	0.47	2.30	4.70	1.69	2.25	4.63	9.44	4.90
55265	0.97	7.52	0.32	2.02	1.20	4.32	0.18	236.84
55266	0.86	5.84	0.79	2.50	2.14	5.37	0.73	73.96
55268	1.09	5.22	3.24	5.10	2.68	6.16	3.82	16.13
55270	1.29	7.30	1.27	5.36	0.74	3.67	0.64	57.57
55274	0.38	1.75	3.51	1.19	4.73	8.26	16.56	4.99
55275	0.50	2.73	1.77	1.50	5.95	12.90	8.37	15.41
55276	0.38	1.70	4.33	1.28	4.08	6.24	15.92	3.92
55277	0.58	3.15	1.97	2.34	1.27	3.97	2.48	16.01

续表 2

Continued table 2

Time period(MJD)	P_{jet}(erg · s^{-1}) $\times 10^{44}$	P_e(erg · s^{-1}) $\times 10^{43}$	P_B(erg · s^{-1}) $\times 10^{42}$	P_p(erg · s^{-1}) $\times 10^{43}$	P_r(erg · s^{-1}) $\times 10^{42}$	U_e(erg · cm^{-3}) $\times 10^{-3}$	U_B(erg · cm^{-3}) $\times 10^{-4}$	$\varepsilon = U_e/U_B$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
56393	1.39	6.23	13.61	6.11	2.38	2.76	6.02	4.58
56393-56394	2.47	12.05	3.92	11.98	2.25	5.33	1.73	30.76
56395-56396	1.32	6.49	6.08	5.74	3.17	4.77	4.47	10.67
54623	0.76	4.90	2.95	2.06	3.08	4.02	2.42	16.59
54628-54630	1.16	7.40	1.69	3.57	4.34	6.49	1.48	43.81
54473	0.66	4.11	3.88	2.01	0.92	1.89	1.79	10.59
54475	0.45	2.85	2.79	1.22	1.53	2.95	2.89	10.22
54481	1.32	8.55	0.96	4.45	0.77	3.63	0.41	89.09
54482	0.85	5.77	1.70	2.46	0.78	2.45	0.72	33.94
54507	0.93	6.30	1.81	2.74	1.15	2.68	0.77	34.76
54558	0.82	5.39	1.63	2.59	0.87	2.29	0.69	33.11
54475.43	0.39	2.38	3.15	1.00	2.36	4.04	5.35	7.55
54478.41	1.53	8.35	2.05	6.54	1.82	6.84	1.68	40.70
54559.25	0.84	4.95	2.06	2.92	3.60	5.13	2.14	24.00
54564.19	0.70	4.03	3.18	2.36	3.32	3.93	3.10	12.68
54589.21	0.75	5.25	0.26	1.92	2.74	12.64	0.64	198.60
54593.23	0.35	1.89	4.73	0.91	2.76	3.48	8.72	3.99

目前对于 Mrk 421 在光变时电子能量和磁场能量是否均分，有 3 种结果。第一种：电子能量和磁场能量接近均分。文[18]对 Mrk 421 时间在 2008 年 6 月 6 日至 15 日的 2 个态进行分析，得到电子能量和磁场能量接近均分。文[8]分析了对 Mrk 421 时间在 2013 年 1 月至 3 月的 4 个态进行分析，通过U_e和U_B的比值得到电子能量和磁场能量接近均分，并分析得到参数 B 和γ_b会影响均分参数。第二种：电子能量比磁场能量大一个数量级。文[13]对 Mrk 421 时间在 2013 年 3 月 10 日至 22 日的 13 个态进行分析，得到电子能量比磁场能量大一个数量级，并且在这 13 天中U_e和U_B的比值变化不大。文[21]对 Mrk 421 时间在 2008 年 2 月至 2016 年 5 月的 7 个态进行分析，通过U_e和U_B的比值得到电子能量比磁场能量大一个数量级。第三种：电子能量远大于磁场能量。文[15]对 Mrk 421 时间在 2008 年 1 月 8 日至 4 月 3 日的 13 个态进行分析，得到电子能量远大于磁场能量喷流可能以粒子为主导。文[19]对 Mrk 421 时间在 2008 年 8 月到 2013 年 2 月的 10 个态进行分析，得到喷流中电子中的功率远高于磁场的功率。根据这 3 种结果，把$1 < \varepsilon < 10$称为电子能量和磁场能量接近均分，$10 \le \varepsilon < 100$称为电子能量比磁场能量大一个数量级，$\varepsilon \ge 100$称为电子能量远大于磁场能量。

本文关于电子能量和磁场能量研究结果 3 种情况都存在，可能是因为我们的样本比较大，在我们的结果中有26%的态的电子能量和磁场能量接近均分，63%的态的电子能量比磁场能量大一个数量级，11%的态的电子能量远大于磁场能量，这意味着 Mrk 421 在光变过程中更可能出现电子能量比磁场能量大一个数量级的情况，同时也暗示了 Mrk 421 的喷流可能是以粒子为主导，这与文[45,27,44]的研究结果一致。

根据表 2 中的数据我们计算了喷流中每种成分所携带能量占总能百分比的平均值，结果见表 3。

表 3 各成分（平均值）携带能量的比值

Table 3 The ratio of energy (average) carried by each component

P_e/P_{jet}	P_p/P_{jet}	P_B/P_{jet}	P_r/P_{jet}
56%	35%	4%	5%

通过表 3 可以发现$P_r \le P_B < P_p < P_e$，其中$P_e > P_B$，进一步表明了 Mrk 421 的喷流是以粒子为主导，与前人的的结论一致[46][28][45]。同时我们也发现了$P_B \lesssim P_r$，这意味着坡印廷通量不能解释辐射功率，与文[27]结果一致。也计算了P_r/P_e 的范围为0.01~0.51，这意味着相对论电子能量中的一小部分可能用于观测到的辐射，与文[27]结果一致。

3.6 3C 279 与 Mrk 421 的光变特性比较

为了更清楚的了解不同源光变时物理特性的差异和共同点，我们将 Mrk 421 和文[2]中的 3C 279 相比较。首先比较电子谱指数p_1，对于电子谱指数p_1，源 3C 279 的p_1范围为1.70~2.70，源 Mrk 421 的p_1范围为1.65~2.38，两个源的p_1的范围比较接近，这意味着不管是 3C 279 还是 Mrk 421 喷流中电子加速的原因可能是由于激波加速或磁重联加速。其次，对于耀变体序列，3C 279 在光变时不存在耀变体序列，而 Mrk 421 在光变时存在反耀变体序列，这表明并不是所有的源在光变时存在耀变体序列或反耀变体序列，同时我们也发现 3C 279 的各光变态中不存在唯一的主导因素，而 Mrk 421 的光变的主导因素可能是γ_b[42]。最后，我们对 3C 279 和 Mrk 421 喷流中的各种功率及均分参数进行比较，文[2]中的 3C 279 有86%的态的均分参数大于 1，而我们的样本中 Mrk 421 的均分参数大于都大于 1，这表明光变时 Mrk 421 喷流中的电子能量大于磁场能量，而 3C 279 光变时的电子能量不一定大于磁场能量。此外通过比较喷流中电子、磁场、冷质子和辐射所携带功率占总功率的百分比，可以发现 3C 279 和 Mrk 421 的喷流都是以粒子为主导。我们也发现 3C 279 和 Mrk 421 的$P_B \lesssim P_r$，坡印廷通量不能解释辐射功率[27]。$P_r < P_e$相对论电子功率的很大一部分将用于产生观测到的辐射[27]。通过对 3C 279 和 Mrk 421 的比较即使两个源的一些参数范围比较接近，这两个源喷流内的物理过程可能是不一样的[46]。

4 结论

对于源Mrk 421，本文基于稳态单区均匀轻子模型对其73个态进行了拟合，研究了该源在光变过程中的物理特性。我们结果可以总结如下：

1、磁场强度B与多普勒因子δ之间存在反相关关系，说明磁场强度B和多普勒因子δ主要在汤姆逊区相互依赖。
2、通过拟合参数中电子谱指数p_1的范围，我们的结果支持光变时的激波解释或大散射角、短时间内被激波加速的粒子在激波下游又被随机过程加速、磁重联加速解释
3、我们的样本中同步峰的峰值频率与峰值光度的关系为：$\nu_{syn}^{pk} \propto \nu L_{\rm syn}^{\rm pk\ 0.67}$，表明Mrk 421在光变时存在反耀变体序列，且Mrk 421的光变可能是于γ_b的变化。
4、本文的均分参数$\varepsilon = U_{\rm e}/U_{\rm B}$的值都大于1，在样本中有26%的态电子能量和磁场能量接近均分，63%的态电子能量比磁场能量大一个数量级，11%的态电子能量远大于磁场能量，这意味着Mrk 421的喷流是以粒子为主导。样本中$P_{\rm B} \lesssim P_{\rm r}$，意味着坡印廷通量不能解释辐射功率，$P_{\rm r}/P_{\rm e}$ 的范围为0.01~0.51，这表明相对论电子能量中的一小部分可能用于观测到的辐射。
5、3C 279和Mrk 421的一些物理参数范围可能比较接近，例如电子谱指数p_1、$P_{\rm B} \lesssim P_{\rm r}$、$P_{\rm r} < P_{\rm e}$等，但这两个源喷流内的物理过程可能是不一样的。

参考文献：

[1] Urry C Megan, Padovani Paolo. Unified Schemes for Radio-Loud Active Galactic Nuclei [J]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 1995, 107 (715): 803-845.
[2] 孙建圆,郭燕飞,邓雪娇,李海风,高志旭,王泽睿,谢照华,杜雷鸣.平谱射电类星体3C 279的宽带能谱光变特性分析[J].天文研究与技术,2021,18(04):456-471.DOI:10.14005/j.cnki.issn1672-7673.20210917.001. SUN J Y ， GUO Y F，DENG X J et al. Analyzing the Variations in the Spectral Energy Distribution of the Flat Spectrum Radio Quasar 3C 279[J]. Astonomical Research & Technology, 2021,18(04):456-471.
[3] Chandra S, Boettcher M, Goswami P, et al. X-Ray Observations of 1ES 1959+ 650 in Its High-activity State in 2016–2017 with AstroSat and Swift[J]. The Astrophysical Journal, 2021, 918(2): 67.
[4] Acciari V A, Ansoldi S, Antonelli L A, et al. Multiwavelength variability and correlation studies of Mrk 421 during historically low X-ray and γ-ray activity in 2015–2016[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2021, 504(1): 1427-1451.
[5] Acciari V A, Ansoldi S, Antonelli L A, et al. Investigation of the correlation patterns and the Compton dominance variability of Mrk 421 in 2017[J]. Astronomy & Astrophysics, 2021, 655: A89.
[6] Urry C M, Padovani P. Unified schemes for radio-loud active galactic nuclei[J]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 1995, 107(715): 803
[7] Ulrich M H, Maraschi L, Urry C M. Variability of active galactic nuclei[J]. Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 1997, 35(1): 445-502.
[8] Baloković M, Paneque D, Madejski G, et al. Multiwavelength study of quiescent states of MRK 421 with unprecedented hard x-ray coverage provided by NuSTAR in 2013[J]. The Astrophysical Journal, 2016, 819(2): 156.
[9] Punch M, Akerlof C W, Cawley M F, et al. Detection of TeV photons from the active galaxy Markarian 421[J]. nature, 1992, 358(6386): 477-478.
[10] 顾春霞,周明,王建成.Mrk 421和3C 454.3的射电与γ射线波段的光变研究[J].天文学进展,2013,31(04):509-518. GU C X ， ZHOU M，WANG J C. The Variability Analysis of Radio and γ-Ray Fluxes for Mrk 421 and 3C 454.3 [J]. Astonomical Research & Technology, 2013,31(04):509-518.
[11] Albert J, Aliu E, Anderhub H, et al. Observations of Markarian 421 with the MAGIC Telescope[J]. The Astrophysical Journal, 2007, 663(1): 125.
[12] Acciari V A, Aliu E, Arlen T, et al. TeV and Multi-wavelength Observations of Mrk 421 in 2006–2008[J]. The Astrophysical Journal, 2011, 738(1): 25.
[13] Aleksić J, Ansoldi S, Antonelli L A, et al. Unprecedented study of the broadband emission of Mrk 421 during flaring activity in March 2010[J]. Astronomy & Astrophysics, 2015, 578: A22.
[14] Markowitz A G, Nalewajko K, Bhatta G, et al. Rapid X-ray variability in Mkn 421 during a multiwavelength campaign[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2022, 513(2): 1662-1679.
[15] Aleksić J, Alvarez E A, Antonelli L A, et al. Mrk 421 active state in 2008: the MAGIC view, simultaneous multi-wavelength observations and SSC model constrained[J]. Astronomy & Astrophysics, 2012, 542: A100.
[16] Shukla A, Chitnis V R, Vishwanath P R, et al. Multiwavelength study of the TeV blazar Mrk 421 during a giant flare[J]. Astronomy & Astrophysics, 2012, 541: A140.
[17] Chen S Z, Yan D H, Hou C, et al. A Multi-wavelength View of VHE Gamma Ray Flares from Mrk421 and Mrk 501 Observed by the ARGO-YBJ Experiment[C]//International Cosmic Ray Conference. 2013, 33: 2690.
[18] Cao G, Wang J C. Particle Acceleration and Emission Processes in Mrk 421[J]. Publications of the Astronomical Society of Japan, 2013, 65(5): 109-109.
[19] Bartoli B, Bernardini P, Bi X J, et al. 4.5 Years of Multi-wavelength Observations of MRK 421 During the ARGO-YBJ and FERMI Common Operation Time[J]. The Astrophysical Journal Supplement Series, 2016, 222(1): 6.
[20] Kapanadze B, Dorner D, Vercellone S, et al. X-ray Flaring Activity of MRK 421 in the First Half of 2013[J]. The Astrophysical Journal, 2016, 831(1): 102.
[21] Fraija N, Benítez E, Hiriart D, et al. Long-term optical polarization variability and multiwavelength analysis of Blazar Mrk 421[J]. The Astrophysical Journal Supplement Series, 2017, 232(1): 7.
[22] Banerjee B, Joshi M, Majumdar P, et al. Time-dependent spectral modelling of Markarian 421 during a violent outburst in 2010[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2019, 487(1): 845-857.
[23] TAN C, XUE R, DU L M, et al. The physical properties of Fermi-4LAC flat spectrum radio quasars[J]. The Astrophysical Journal Supplement Series, 2020, 248(2): 27.
[24] Yamada Y, Uemura M, Itoh R, et al. Variations of the physical parameters of the blazar Mrk 421 based on analysis of the spectral energy distributions[J]. Publications of the Astronomical Society of Japan, 2020, 72(3): 42.
[25] Abdo A A, Ackermann M, Ajello M, et al. Fermi Large Area Telescope observations of Markarian 421: The missing piece of its spectral energy distribution[J]. The Astrophysical Journal, 2011, 736(2): 131.
[26] Bartoli B, Bernardini P, Bi X J, et al. Long-term monitoring of the TeV emission from Mrk 421 with the ARGO-YBJ experiment[J]. The Astrophysical Journal, 2011, 734(2): 110.
[27] Yan D H, Zeng H D, Zhang L. The physical properties of Fermi BL Lac objects jets[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2014, 439(3): 2933-2942.
[28] GHISELLINI G, TAVECCHIO F, GHIRLANDA G. Jet and accretion power in the most powerful Fermi blazars[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2009, 399(4): 2041-2054.
[29] GHISELLINI G, TAVECCHIO F, FOSCHINI L, et al. General physical properties of bright Fermi blazars[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2010, 402(1): 497-518.
[30] Ahnen M L, Ansoldi S, Antonelli L A, et al. Multiband variability studies and novel broadband SED modeling of Mrk 501 in 2009[J]. Astronomy & Astrophysics, 2017, 603: A31.
[31] Ding N, Zhang X, Xiong D R, et al. The physical properties of Fermi TeV BL Lac objects' jets[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2017, 464(1): 599-612.
[32] Kirk J G, Duffy P. Particle acceleration and relativistic shocks[J]. Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics, 1999, 25(8): R163.
[33] Virtanen J J P, Vainio R. Stochastic acceleration in relativistic parallel shocks[J]. The Astrophysical Journal, 2005, 621(1): 313.
[34] Stecker F W, Baring M G, Summerlin E J. Blazar γ-rays, shock acceleration, and the extragalactic background light[J]. The Astrophysical Journal, 2007, 667(1): L29.
[35] Guo F, Li H, Daughton W, et al. Formation of hard power laws in the energetic particle spectra resulting from relativistic magnetic reconnection[J]. Physical Review Letters, 2014, 113(15): 155005.
[36] Kino M, Takahara F, Kusunose M. Energetics of TeV blazars and physical constraints on their emission regions[J]. The Astrophysical Journal, 2002, 564(1): 97.

[37] FOSSATI G, MARASCHI L, CELOTTI A, et al. A unifying view of the spectral energy distributions of blazars[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 1998, 299(2): 433-448.
[38] Tramacere A, Massaro F, Cavaliere A. Signatures of synchrotron emission and of electron acceleration in the X-ray spectra of Mrk 421[J]. Astronomy & Astrophysics, 2007, 466(2): 521-529.
[39] Tramacere A, Giommi P, Perri M, et al. Swift observations of the very intense flaring activity of Mrk 421 during 2006. I. Phenomenological picture of electron acceleration and predictions for MeV/GeV emission[J]. Astronomy & Astrophysics, 2009, 501(3): 879-898.
[40] ZHANG J, ZHANG S N, LIANG E W. Blazar anti-sequence of spectral variation within individual blazars: cases for Mrk 501 and 3C 279[J]. The Astrophysical Journal, 2013, 767(1): 8.
[41] Wang Y, Zhu S, Xue Y, et al. X-ray spectral variations of synchrotron peak in BL Lacs[J]. The Astrophysical Journal, 2019, 885(1): 8.
[42] Massaro F, Tramacere A, Cavaliere A, et al. X-ray spectral evolution of TeV BL Lacertae objects: eleven years of observations with BeppoSAX, XMM-Newton and Swift satellites[J]. Astronomy & Astrophysics, 2008, 478(2): 395-401.
[43] Ghisellini G, Tavecchio F, Foschini L, et al. General physical properties of bright Fermi blazars[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2010, 402(1): 497-518.
[44] Hu W, Yan D, Hu Q. Correlations between γ-ray luminosity and magnetization of the jet as well as relativistic electron injection power: cases for Mrk 421, 3C 454.3 and 3C 279[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2021, 503(2): 2523-2538.
[45] Zhang J, Liang E W, Zhang S N, et al. RADIATION MECHANISMS AND PHYSICAL PROPERTIES OF GeV–TeV BL Lac OBJECTS[J]. The Astrophysical Journal, 2012, 752(2): 157.
[46] Albert A, Alfaro R, Alvarez C, et al. Long-term spectra of the blazars Mrk 421 and Mrk 501 at TeV energies seen by HAWC[J]. The Astrophysical Journal, 2022, 929(2): 125.

Analyzing the Variations in the Spectral Energy Distribution of the BL Lac object Mrk 421

Guo Yanfei[1], Sun Jianyuan[1] Song Yujei[1], Xu Yunbing[1], Xie Zhaohua[1], Du Leiming[1]
(1. School of Physics and Electronic Information, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China)

Abstract: The spectral energy distributions (SEDs) datas of Mrk421 are collected by our, a total of 73 states as research samples, and the single-region lepton model under the electron energy spectrum of the steady-state transition power law spectrum is applied. Then study the physical properties of Mrk421 jets during the light transition. Our main results are as follows: (1) there is an anticorrelation between magnetic B and Doppler δ in the sample, indicating that magnetic B and Doppler δ are interdependent in the Thomson region.(2) Electron spectral index p_1 supports the interpretation of shock wave or magnetic reconnection during light variation of Mrk421.(3) There is a positive correlation between the synchronous peak frequency $log\nu_{syn}^{pk}$ and the peak luminosity $log\nu_{syn}^{pk}L_{syn}^{pk}$, which means that there is an anti-flare variant sequence in the Mrk421 during the light change.(4) According to the equal partition parameter $\varepsilon = U_e/U_B$ (the ratio of relativistic electron energy density to magnetic field energy density), the electron energy and magnetic field energy of 26% of the states are nearly equal partition, The electron energy of 63% of the states is an order of magnitude larger than the magnetic field energy, The electron energy of 11% of the states is much larger than the magnetic field energy. This indicates that Mrk 421 is more likely to have the phenomenon that the electron energy is one order of magnitude larger than the magnetic field energy during the light change. It also means that the jets in the Mrk421 are dominated by particles; The relationship from $P_e > P_B$, it is further shown that the Mrk421 jets are particle-dominated, $P_B \lesssim P_r$, meaning that the Poynting flux cannot account for the radiated power, The ranges of P_r/P_e from 0.01 to 0.51, shows that a small fraction of the relativistic electron energy may be used for the observed radiation. (5) Some ranges of the physical parameters of 3C 279 and Mrk421 may be relatively similar, but the physical processes inside the jets of these two sources may not be the same.
Keywords: BL Lac object; Mrk 421; light variation